



Mesure, expérience et objet théorique en physique

Michel Paty

► To cite this version:

Michel Paty. Mesure, expérience et objet théorique en physique. Instruments de mesure. Philosophies de la mesure, 1993, Lyon, France. p.159-174. halshs-00167597

HAL Id: halshs-00167597

<https://shs.hal.science/halshs-00167597>

Submitted on 21 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

in Beaune, Jean-Claude (dir.), *La mesure, instruments et philosophies*, Champ Vallon, Seyssel (01), 1994, p. 159-174. (Exposé au Colloque «*Instruments de mesure. Philosophies de la mesure*», Centre d'analyse des formes et des systèmes, Faculté de Philosophie, Université de Lyon 3, 28-29 octobre 1993.)

Mesure, expérience et objet théorique en physique

par

Michel PATY**

RESUME

En physique, l'expérience prend la forme de la mesure, pour aboutir à un résultat numérique, qui implique les notions d'ordre de grandeur et de précision. Le jeu - complémentaire plus que contradictoire - de ces deux caractères est un effet de l'imbrication du concept, porteur d'un contenu, et de sa forme mathématique. L'instrument de mesure, quant à lui, prépare et détermine les conditions de la production du phénomène, lequel constitue le véritable objet de l'expérience. Mais en tant que tel, justement, le phénomène ne se laisse pas réduire exactement aux conditions définitoires de la préparation: il implique que la précision doive être considérée de manière relative, dans la marge de l'interprétation. Parce que le rôle de l'instrument n'est pas seulement de fournir la "mesure" mais de produire le "phénomène", la conclusion à tirer d'un résultat expérimental, aussi précis fût-il, ne peut être une inférence immédiate. La notion de mesure ne peut éluder la question de l'interprétation du phénomène, c'est-à-dire de la signification qu'on lui accorde, et celle-ci entretient un rapport étroit avec la nature de l'objet théorique, sur lequel porte, en définitive, l'interprétation. Des exemples, pris dans l'histoire de la physique, permettent d'explicitier l'analyse proposée.

INTRODUCTION

Le thème de la mesure en physique, qui appelle d'emblée les notions d'instrument et de résultat - sous une forme d'abord numérique -, suscite la question plus générale du statut de l'expérience dans ce domaine de la

** Equipe REHSEIS, UPR 318, CNRS et Université Paris 7
2 Place Jussieu, F- 75251 PARIS Cedex 05, France.

connaissance. Cette question comporte un certain nombre d'aspects, dont je voudrais faire une évocation liminaire tout en renvoyant à une analyse proposée par ailleurs¹, qui constituent la toile de fond des considérations qui vont suivre. Ces aspects ne sont pas acquis d'emblée, et posent autant de problèmes à plusieurs niveaux, dont l'examen conditionne ce que l'on peut dire sur "la mesure, l'expérience et l'objet de la théorie". Ils concernent essentiellement la question de la *validité* du résultat, celle de sa *signification*, et celle de la *fonction de l'expérience*.

La question de la *validité* du résultat elle-même est plus complexe qu'il pourrait y paraître à première vue, et n'est pas indépendante des deux autres. La question de la *signification* ne se réduit évidemment pas à l'acception "banale"² qui désigne sa portée, sa force, son importance ou, pour tout dire, son poids - ces jugements, d'ailleurs, ne vont pas non plus de soi. Elle désigne, selon une autre acception, plus profonde du point de vue de la connaissance, un *contenu* physique, c'est-à-dire la transcription du résultat en termes de propriétés de grandeurs, de concepts et de théorie. Ces transcriptions ou traductions se distribuent, suivant les cas, sur une gamme d'énoncés qui va de la simple expression d'une donnée numérique ou d'un fait particulier à une proposition théorique générale, avec des variations et des passages, pour un même résultat, d'une disposition à une autre sur la gamme lorsque surviennent des réorganisations théoriques (un fait devient principe, etc.).

Quant à la *fonction* de l'expérience, elle dépend des circonstances dans lesquelles la prise en compte du résultat intervient, soit qu'il s'agisse d'un travail d'élaboration et de "découverte", soit que l'on se situe dans des circonstances de "réception", de diffusion ou d'enseignement. (On notera que je parle ici de *réception*, faisant droit à l'attention aux contextes *historiques* effectifs de découverte et de réception, au contraire de l'opposition, anhistorique et arbitraire, et pourtant si répandue, de la première à la "justification"³). L'expérience, avec son résultat, peut constituer le point de départ d'un travail théorique, suivant des modalités qui ont à voir avec les formulations particulières des problèmes considérés (lesquelles diffèrent selon les auteurs et constituent des marques de leurs "styles" en matière de recherche⁴). Ou, au contraire, au terme d'un parcours d'élaboration, elle servira de pierre de touche pour une théorie donnée - et, ici encore, ce ne sera jamais d'une manière univoque.

Au centre de toutes ces considérations se tient l'enjeu épistémologique fondamental du rôle de l'expérience dans la constitution, le développement ou la consolidation d'une connaissance, à savoir le rapport de l'expérience à la théorie. Nous allons l'examiner sous l'angle évoqué de la signification, mais non pas tant, cette fois, du résultat lui-même que de l'expérience en tant que telle. Dépasant la dimension simplement épistémologique du rôle des résultats tel qu'il se manifeste dans les études de cas, on peut espérer accéder à une portée philosophique plus générale sur la nature de

¹ Paty (1992b).

² Comme on dit couramment "un résultat significatif".

³ Voir Paty (1990a), chapitre 4.

⁴ Sur la question du "style scientifique", voir Granger (1968), Paty (1990), chapitre 4 et (1993), chapitre 1.

la connaissance en se posant la question : de quoi l'expérience est-elle la preuve, et de quelle manière ?

ORDRE DE GRANDEUR ET PRECISION

En physique, l'expérience prend la forme de la mesure, par des instruments, pour connaître la valeur d'une *grandeur* (ou de grandeurs, au pluriel) *mathématisée(s)*. Deux attributs caractéristiques de la mesure au sens de la physique en ressortent : l'*ordre de grandeur* (qui implique un jugement de nature qualitative) et la *précision*, directement numérique. Les deux sonnent de manière bien différente, voire s'opposent ; pourtant, dans la pratique, les physiciens y font également appel.

S'agissant de mesure, comme il est question de grandeurs prenant des valeurs numériques (vitesse, force, entropie, etc.), on s'obnubile souvent sur cet aspect de l'expérience et de son résultat. Pourtant, une réflexion immédiate fait voir que, dans la détermination précise, par la mesure et le résultat numérique, d'un fait, si nous obtenons éventuellement la garantie de la *justesse* de la théorie, nous n'y trouvons pas l'*idée* de la théorie. L'idée vient de l'expérience sous son aspect "qualitatif", c'est-à-dire, en fait, conceptuel : à savoir l'expérience en tant que son résultat peut être exprimé en termes de phénomènes. Les décimales ne jouent pas, ici, un rôle moteur ou décisif. Elles ne jouent un rôle que pour la détermination d'un fait caractérisé, et surtout dans la confirmation d'une théorie - *modulo* des modifications éventuelles par ajouts d'hypothèses supplémentaires. (Ce qui rejoint, notons-le en passant, les arguments contre l'induction théorique à partir des données d'observations). Face à une théorie (qui peut être une théorie augmentée de modèles), τ , couvrant un domaine d'approximation ΔT , la position en quelque sorte minimale du physicien est que l'expérience est seulement requise de donner un résultat qui entre dans ce domaine de définition : c'est un réquisit de nature conceptuelle et non pas numérique.

Les physiciens ont une expression - et c'est, en vérité, une notion - pour rendre compte de cet état de choses : "*ordre de grandeur*". L'*ordre de grandeur* renvoie au phénomène dans ses grandes lignes, sans préoccupation, à ce stade, pour le détail et la précision numérique. A priori, cette notion paraîtrait paradoxale pour une science où la précision et l'exactitude des prédictions, dues à la mathématisation, est si importante et fait pratiquement partie de sa définition. Elle ne s'oppose pas à la précision, requise au stade ultérieur de la confirmation - ou, plus généralement, du test. Mais elle a, pour nous, l'avantage de souligner cet aspect de la théorie, fondamental pour l'intelligibilité - et qui montre sans contestation possible que la physique, en tant que science, est une pensée -, que son contenu est exprimé par les grandeurs qui lui sont propres, indépendamment, en quelque sorte, des valeurs particulières prises par celles-ci.

On indique, par la considération des *ordres de grandeur*, la direction vers laquelle on s'oriente dans la description d'un phénomène, la tendance, les caractères généraux, exprimés en termes de concepts et d'imbrication structurée de

ces concepts. Par exemple, le résultat négatif des expériences d'optique faites, au long du dix-neuvième siècle, pour détecter le mouvement absolu de la Terre par rapport à l'éther était traduit en propositions générales, quelles qu'elles soient, n'appelant pas de détail numérique - bien que, dans certains cas, ces détails fussent implicitement présents⁵ -: relativité du mouvement par rapport aux lois de l'optique, ou encore constance de la vitesse de la lumière dans toutes les directions (isotropie, ou "absence d'anisotropie", cette dernière expression insistant sur la différence avec le résultat attendu en principe). Ces expériences furent faites avec une grande précision (par E. Mascart notamment, qui examina tous les phénomènes optiques connus afin de déterminer comment leurs lois étaient modifiées par le mouvement des corps)⁶, mais plutôt dans l'idée de voir une tendance confirmée ou infirmée que dans celle d'exhiber un résultat numérique.

Dans d'autres cas, il s'agit de vérifier une théorie ou un modèle explicatif à travers une formule, et la *précision* du résultat importe alors au premier chef. Telles, en optique au dix-neuvième siècle encore, les expériences faites, par Fizeau et par d'autres, pour vérifier l'hypothèse de Fresnel de l'entraînement partiel de l'éther. Ces expériences portaient sur la mesure du "coefficient d'entraînement" qui apparaît dans la formule de Fresnel donnant la modification de la vitesse de la lumière dans un milieu réfringent en fonction de la vitesse du mouvement de ce milieu⁷. Tel est aussi le cas de l'expérience de Michelson et Morley qui se proposait expressément de mettre en évidence des effets du second ordre en $\frac{v}{c}$, pour dépasser la compensation automatique que le coefficient de Fresnel, au premier ordre, opposait à la modification attendue des lois de la réfraction de la lumière par le mouvement du corps réfringent. C'était alors, en général, la précision du résultat de mesure qui était mise en avant comme décisive⁸.

Le cas des expériences sur l'optique des corps en mouvement fait bien voir comment les considérations d'ordre de grandeur et de précision ne sont pas en opposition, mais bien plutôt complémentaires, par le rôle qu'y tiennent respectivement l'*hypothèse* (ou le modèle) de l'entraînement partiel de l'éther et le *coefficient* de Fresnel, dont le jeu mutuel (et le détachement progressif du second par rapport à la première) est celui d'un accent mis tantôt sur l'aspect qualitatif et tantôt sur l'aspect quantitatif⁹.

Des tests effectués sur des théories plus récentes illustrent de manière plus frappante encore l'importance de la précision numérique des résultats: on a pu dire que les deux grandes théories physiques contemporaines, si différentes en

⁵ Je renvoie ici à la question de la validité du résultat évoquée par ailleurs: voir plus haut et Paty (1992b).

⁶ Cf. Pietrocola (1982). Mascart montra que les lois de l'optique n'étaient pas modifiées.

⁷ c étant la vitesse de la lumière dans le vide, et $\frac{c}{n}$ la vitesse de la lumière dans un milieu réfringent d'indice de réfraction n , la vitesse de la lumière modifiée dans ce milieu lorsqu'il est animé d'un mouvement de vitesse v par rapport à l'éther est : $V = \frac{c}{n} \pm v(1 - \frac{1}{n^2})$. Le facteur $(1 - \frac{1}{n^2})$ est le coefficient de Fresnel.

⁸ Mais en étant toujours subordonnée à des considérations de nature théorique sur la signification physique du résultat: cf. Paty (1992b).

⁹ Comme j'essaie de le montrer par ailleurs: Paty (à paraître).

nature au demeurant, que sont l'Electrodynamique quantique et la Relativité générale, ont atteint des degrés de précision, dans la prédiction d'effets et dans les observations (les mesures) correspondantes, qui n'avaient jamais été égalés auparavant. On notera à ce propos que la précision du résultat d'expérience n'a de sens qu'en corrélation à une égale précision des prédictions théoriques. On peut évoquer, cependant, des précédents historiques dans la "montée en précision", tel celui, au dix-huitième siècle, qui correspond au problème des trois corps en théorie newtonienne de la gravitation (irrégularités des mouvements des planètes, de la Terre et de la Lune, trajectoires des comètes), asseyant pour longtemps l'emprise du "système newtonien" en mécanique et en astronomie. On remarquera toutefois que ces arguments sur la précision restaient encore assez "qualitatifs" tant que n'existait pas une théorie des erreurs: celle-ci s'imposa au début du dix-neuvième siècle (Laplace, Gauss, etc.), et son importance effective en physique sur la signification des résultats numériques apparaît en corrélation avec la plus grande mathématisation de cette science par la quantification¹⁰ exacte de ses grandeurs - dont leur définition est indissociable.

Ces caractères, ordre de grandeur et précision, dont le jeu, dans le raisonnement physique, est plus complémentaire que contradictoire, apparaissent tous deux comme une conséquence de ce que la physique - par exemple, une théorie physique donnée - fait appel à des concepts qui prennent la forme de grandeurs mathématisées, et qu'il y a, dans l'expression même de tels concepts ou grandeurs, une imbrication entre le *contenu* (le fait que le concept est porteur d'un contenu et ce contenu précis lui-même), et la *forme mathématique*.

On serait tenté, de manière en quelque sorte intuitive, de rapporter le contenu à l'*ordre de grandeur*, et l'expression mathématique, susceptible de prendre des valeurs, à la *précision*. On n'oubliera pas, cependant, que la mathématisation d'une grandeur porte ses effets avant tout sur son contenu, par les relations qu'elle implique avec les autres grandeurs auxquelles les relations de la théorie les rattachent, et que le caractère numérique n'apparaît qu'en tant que les grandeurs peuvent être ramenées, souvent par d'autres grandeurs intermédiaires, à des quantités arithmétiques. On perdrait la richesse de l'expression mathématique à la réduire à une pure forme arithmétique, ce à quoi expose souvent une attention trop exclusive à l'idée de mesure au détriment de celle d'expérience. La mathématisation est avant tout la forme de la mise en relation des grandeurs, et elle est inhérente, dans une théorie, à leur définition. Contenu conceptuel et forme mathématique sont étroitement solidaires, en sorte que l'expression mathématique des concepts est aussi bien responsable des contenus et des ordres de grandeurs que de la précision des résultats numériques. La remarque "intuitive" que nous avons faite comporte cependant quelque chose d'éclairant, si on la modifie pour tenir compte de ces observations : l'*ordre de grandeur* renvoie au contenu, c'est-à-dire à un ordre avant tout relationnel, et la *précision*, au fait que les grandeurs physiques considérées sont susceptibles de prendre des valeurs. Nous nous proposons, maintenant, d'explicitier cette distinction, en ayant égard aux *phénomènes*.

¹⁰ Je l'entends au sens usuel.

LES MEDIATIONS DANS LA MISE A RELATION A L'EXPERIENCE

Dans la mise en relation des propositions théoriques à l'expérience, la conception empiriste, souvent dominante dans l'épistémologie implicite des physiciens, et actuellement largement revendiquée chez les philosophes des sciences, assimile l'*expérience* elle-même, comme réalisation et comme résultats, et le fait de la *mise en relation* avec l'expérience pour des éléments de représentation théorique: elle ignore la nature médiate de ce rapport. De la théorie, la conception empiriste ne retient que le caractère logique des relations entre les propositions. De l'expérience, elle admet que ses termes sont des données immédiates (ou, du moins, qu'il est possible de la ramener à de tels termes). Les propositions théoriques sont conçues comme étant directement mises en correspondance avec les données d'expérience par des règles qui sont de définition. Il suffirait alors de se donner (de définir) des règles de correspondance pour connaître la signification des propositions théoriques, le processus de construction qui établit ces dernières n'important pas (il est rejeté comme extérieur à la reconstruction finale du système théorique, seul digne d'être philosophiquement considéré)¹¹. Cela sous-entend que le contenu physique des propositions théoriques serait directement donné par le résultat de l'expérience, à laquelle sont ramenées les significations. Parler de la physique comme une science empirique donne crédit à cette conception. Pourtant, elle est passible de critique et l'on sera mieux fondé à parler de "science à contenu empirique".

Car, ce qui donne le contenu physique des propositions théoriques, ce n'est pas l'expérience directement, mais la *mise en relation* de ces propositions à l'expérience: en d'autres termes, l'expérience n'est pas la référence¹². Cette mise en relation comprend une série de médiations. Ce sont, tout d'abord, des médiations du côté de l'expérience elle-même, qui la rattachent aux données des sens par des couches successives de constructions assimilées. Les impressions des sens ne sont pas isolables par rapport aux idées, la distinction n'étant jamais faite que par nous, en fonction de nos catégories de pensée. Si l'expérience exprime "ce qui est donné", ceci est en même temps déjà reçu par nous. Il n'existe pas quelque chose qui serait un "donné brut", et il y a, entre les impressions des sens et les expériences constituées, des constructions mentales et théoriques intermédiaires (à plusieurs niveaux). C'est à ce stade que se constitue l'"intuition", qui est le terrain même de l'intelligibilité. L'intuition, disait Einstein, est la somme de nos expériences intellectuelles accumulées¹³.

Ce sont, ensuite, des médiations du côté de la théorie: entre la logique, qui régit l'enchaînement des propositions formelles, et l'expérience, se tient la construction théorique proprement dite, qui comprend plusieurs états. A un premier niveau se tiennent les règles élémentaires de coordination initialement posées, portant sur les grandeurs originelles à partir desquelles l'on bâtit une théorie (par exemple, l'espace, le temps, etc., en mécanique, ou en théorie de la

¹¹ Cette conception du positivisme et de l'empirisme logiques a marqué durablement la philosophie des sciences dans le monde "anglo-saxon".

¹² Sur le problème de la référence des propositions théoriques, voir Paty (1992a).

¹³ Paty (1993), chapitre 9.

relativité). Puis les relations entre les grandeurs, l'apparition de nouvelles grandeurs (par exemple, le tenseur métrique, pour la Relativité générale) construites à partir des premières, et les réorganisations de propositions qui résultent du travail théorique. Enfin, la correspondance qui s'ensuit (et qui n'était pas donnée au départ) entre les propositions obtenues au terme de la déduction et les données de l'expérience (le temps et l'espace exprimés par les formules de transformation entre deux repères en mouvement relatif dans la théorie de la relativité restreinte, le champ de gravitation fourni par le tenseur métrique en Relativité générale, etc.). Cette correspondance n'est pas posée par définition, mais se présente comme une conséquence nécessaire du travail aux deux stades précédents. La question du contenu physique des propositions théoriques et des grandeurs est indissociable de cette considération, qui conditionne toute la pensée du rapport de la théorie à l'expérience. On comprend par là, en particulier, que le problème de la décision sur l'implication théorique d'un résultat d'expérience soit aussi complexe qu'il l'est.

Une théorie physique n'est pas un simple "système formel interprété", sauf dans une perspective purement axiomatique, utile, certes, pour analyser sa structure, mais artificielle puisque séparée par définition de ses contenus effectifs, dont il faut alors trouver un substitut plus formel que réel¹⁴. Nous dirons plutôt qu'une théorie est un système de concepts formalisés, qui comprend les interprétations (au sens de l'expression du contenu physique) comme un effet de l'organisation systémique, ce système ayant été construit en relation à une *pensée des phénomènes*.

C'est à ces derniers que nous en revenons donc.

LA PRODUCTION DU PHENOMENE DANS L'EXPERIENCE

A y bien réfléchir, le rôle de l'instrument de mesure est de préparer et déterminer les conditions de la production du phénomène, lequel constitue le véritable objet de l'expérience. Ce trait n'est pas caractéristique de la physique quantique seulement (dont les modalités propres, particulièrement sensibles à cet égard, ont spécialement attiré l'attention sur lui), mais de toute expérience en physique. En tant qu'il est, justement, l'objet de l'expérience, le phénomène ne se laisse pas réduire exactement aux conditions "définitoires" de la préparation : il implique que la précision doive être considérée de manière relative, dans la marge de l'interprétation. Parce que le rôle de l'instrument n'est pas seulement de fournir la "mesure" mais de produire le "phénomène" - manifestation tangible de ce qu'une pensée est ici à l'oeuvre, et de la puissance de cette pensée -, la conclusion à tirer d'un résultat expérimental, aussi précis fût-il, ne peut être une inférence immédiate.

Arrêtons-nous quelques instants à cet aspect, sur lequel on ne saurait trop insister, de l'expérience comme construction du phénomène (à partir de la prévision d'un effet possible, considérant une connaissance théorique donnée). Notre intelligibilité s'attache d'abord, en tant qu'il s'agit de phénomènes, à leur

¹⁴ La théorie quantique (mécanique quantique, théorie quantique des champs) pose, à cet égard, des problèmes particuliers, que je ne puis aborder ici.

description qualitative, avant de s'arrêter aux aspects purement quantitatifs, et c'est l'ordre de grandeur qui intervient en premier lieu. Les exemples frappants seraient légion. Prenons-en un : la courbure des rayons lumineux dans un champ de gravitation. Cette prédiction de la théorie de la relativité générale donna lieu à une double expédition, organisée en 1919 par Eddington, en Afrique et au Brésil, pour mesurer, à la faveur d'une éclipse totale du Soleil, l'éventuelle déviation de la lumière provenant des étoiles et passant au voisinage de notre astre.

La réaction d'Einstein à l'annonce du résultat d'une déviation correspondant à la valeur prédite par sa théorie a fait l'objet de maints commentaires. On a dit - faussement - que le résultat lui était indifférent, comme si la seule beauté mathématique de sa construction avait pour lui valeur de vérité. En réalité, il en fut très heureux, tout en affirmant que s'il eût été autre, cela n'aurait en rien atteint sa conviction du bien-fondé de sa théorie - ce bien-fondé était, à ses yeux, autant assuré sur le caractère de la synthèse théorique que sur l'évidence des phénomènes qui en avaient été l'objet. Le résultat détermina, en tout cas, l'acceptation de la théorie de la relativité aussi bien par l'ensemble des scientifiques que dans le public¹⁵.

D'un autre côté, considéré *a posteriori*, la différence mesurée, sur les photographies, entre la position apparente des étoiles lors de l'éclipse, et leur position réelle lorsque la trajectoire des rayons lumineux n'est pas affectée par la masse solaire, était très imprécise et portait sur une statistique trop faible - par le petit nombre d'étoiles dans le champ considéré -, pour que le résultat pût être, de fait, considéré comme vraiment probant. Déjà les opposants à la théorie d'Einstein faisaient valoir, à l'époque, ce côté précaire du résultat factuel. Ces circonstances ont donné lieu à diverses interprétations. Les adeptes du relativisme sociologique de la connaissance scientifique y trouvent une preuve - ou, du moins, un indice - de ce que la signification d'une expérience en termes de théorie est décidée par le consensus des scientifiques à une époque donnée. On remarquera en passant que cette réponse sociologique reprend, en fait, les termes du problème tels que les posait la conception empiriste (logique), comme si la décision ne devait tenir qu'à un résultat d'expérience.

En définitive, des observations ultérieures, plus précises, devaient confirmer le résultat, c'est-à-dire la conformité du phénomène de déviation des rayons lumineux au voisinage de grandes masses avec la prédiction théorique de la Relativité générale. Il reste ce fait - historique - que l'observation de 1919 corroborait, de manière qualitative, la prédiction, non classique, de la théorie nouvelle, et que c'est cela qui fut jugé significatif. Dans ce premier temps, ce qui importait, c'était le caractère de nouveauté du phénomène, qu'il tenait de la théorie qui le prédisait. Cette théorie disposait, par ailleurs, de certains atouts remarquables en sa faveur : une structure théorique très satisfaisante, une portée considérable (renouvellement de la théorie de la gravitation de Newton et soumission de cette dernière au principe de relativité, lien direct aux puissantes géométries non euclidiennes), et le raccordement à la théorie classique (la théorie newtonienne était une approximation pour les faibles champs de gravitation), contre quelques inconvénients (modification, généralement difficile à accepter,

¹⁵ Une minorité de scientifiques, mathématiciens et physiciens, avait déjà admis la théorie d'Einstein dès sa formulation. Cf. Glick (1987), Paty (1987).

des concepts d'espace et de temps).

C'était donc, à ce stade, le caractère qualitatif du phénomène qui importait, considérant par ailleurs que la prédiction, également faite par la théorie, de l'avance annuelle du périhélie de la planète Mercure - observée dès le milieu du dix-neuvième siècle et restée inexpliquée dans la théorie newtonienne - remplissait fort bien son rôle du point de vue strictement quantitatif, par le degré de la précision obtenue. Ce qui importait, c'était la possibilité d'un phénomène auparavant impensé - du moins pour la plupart -, et l'indication de sa réalité. L'expérience *réalisait la pensée du phénomène*, ce dernier étant exprimé en termes des concepts de la prédiction théorique (la courbure de l'espace, la métrique spatio-temporelle, c'est-à-dire la reformulation de l'espace-temps selon la nouvelle vue sur la gravitation).

Les circonstances historiques évoquées font voir que l'on juge de la valeur de la théorie non pas à partir d'un résultat expérimental ou observationnel, mais d'un ensemble de considérations à la fois théoriques et factuelles: et, certes, il est difficile de dire quel fut exactement le poids de chacun de ces caractères. Le jugement d'ensemble - à cette époque, dans les années vingt - apparaît global, tendanciel plutôt que contraignant. A preuve: la théorie de la relativité générale sera plus ou moins oubliée par les physiciens durant de nombreuses années, quand ils la trouveront décidément très étrangère aux problèmes auxquels ils se trouveront confrontés, avant d'être reprise plus tard, pour des raisons inverses.

La fonction fondamentale de l'expérience qui la rapporte à la nature du phénomène - l'expérience comme production du phénomène - est particulièrement bien illustrée par le type de raisonnement que l'on appelle, de manière significative, *expérience de pensée*¹⁶, bien qu'il ne s'agisse pas d'une expérience à proprement parler, puisqu'elle reste dans l'espace des idées, sans réalisation pratique. On considère, par une "expérience imaginaire", les concepts ou les grandeurs d'une théorie donnée, rendant explicite le réseau de leurs relations, pour aboutir à la déduction de propriétés de ces grandeurs envisagées en termes d'effets, au sens des phénomènes. L'*expérience de pensée* partage par là bien des traits de l'expérience entendue au sens usuel. C'est l'expérience sans la mesure, le contenu sans le numérique. Elle fait voir ce qu'est un contenu, par l'imbrication des concepts. Elle met en évidence la nature systémique des concepts d'une science à contenu empirique. Elle transcrit en des termes "intuitifs" - au sens, dont on a parlé plus haut, de l'intuition du contenu physique des grandeurs considérées - le recouvrement du "contenu formel" et du contenu empirique. Elle le fait en termes de phénomène: un *phénomène* non pas réalisé mais *virtuel*, en sorte que l'on pourrait parler, à ce propos, de "*contenu physique virtuel*". Comme elle joue totalement dans l'espace symbolique et intellectuel des concepts, elle concerne "toute expérience possible". Cette systématisation contraste avec la singularité d'une expérience effective, et marque le caractère englobant du "virtuel" par rapport à l'"actuel"¹⁷.

¹⁶ Ou encore *expérience imaginaire*, *Gedankenexperiment* en allemand, *thought experiment*, en anglais.

¹⁷ Sur cette différence, voir Granger (1992, 1993).

INTERPRETATION DU PHENOMENE ET NATURE DE L'OBJET THEORIQUE

La dernière question que je voudrais aborder est celle de l'interprétation du phénomène tel qu'il se manifeste dans l'expérience - c'est-à-dire la signification qui lui est attribuée, aux sens évoqués en commençant -, et de son rapport à la nature de l'objet théorique, sur lequel porte, en définitive, l'interprétation.

On doit distinguer, en ce qui concerne la signification attribuée à un résultat expérimental, selon qu'il s'agit d'un travail d'élaboration théorique ou des circonstances de la réception. Les fortunes diverses rencontrées par le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley¹⁸ peuvent servir à illustrer l'un aussi bien que l'autre.

Pour ce qui concerne les travaux d'élaboration théorique, on se souviendra de la diversité des énoncés par lesquels ce résultat fut exprimé, suivant les auteurs et les contextes théoriques - théories purement optiques, théories électromagnétiques. En ce qui concerne ces dernières, le rôle de l'expérience fut très différent chez Lorentz et Poincaré d'une part, pour qui elle fut, à un certain stade de l'élaboration théorique, un point de départ (elle justifiait l'hypothèse des transformations de Lorentz, en particulier celle de la contraction des longueurs), et d'autre part chez Einstein qui, s'il ne l'ignora pas, ne s'en servit que comme d'une indication, parmi d'autres, de la validité universelle du principe de relativité.

La leçon à en tirer est essentiellement que la signification attribuée à l'expérience, dans le travail d'élaboration (pour ne pas dire de découverte, à laquelle ce travail aboutit), est rapportée au problème posé, selon la manière dont il a été posé, c'est-à-dire à la théorie recherchée. Pour une théorie dynamique (en l'occurrence, l'électrodynamique selon Lorentz et Poincaré), la conclusion de l'expérience est formulée en termes d'un effet de la dynamique, et elle est considérée de manière particulière, c'est-à-dire singularisée, dans cet ordre : d'elle, on infère la loi de transformation qu'elle suggère, conçue comme étant de nature dynamique. Si la théorie est "principielle", ce qui est le cas de la théorie de la relativité restreinte au sens d'Einstein, la leçon de l'expérience est homogène à ce caractère, et ne peut alors qu'être la manifestation d'une propriété générale, sans considération particulière ni pour elle, ni pour une dynamique : général est son énoncé (elle concourt à la formulation du principe de relativité), et elle participe d'un ensemble de résultats de même nature, qui s'expriment par le même énoncé.

Quant au contexte de la réception d'une théorie, l'expérience y fut l'objet de plusieurs lectures ou interprétations, et se vit attribuer un poids qui était directement fonction de ces dernières. Pour qui se préoccupait de la théorie de la relativité restreinte au sens d'Einstein, mais en la percevant (d'ailleurs à tort) comme une théorie constituée sur cette expérience, ce qui fut généralement le cas de ceux qui s'opposaient à la théorie, ni cette dernière (et les modifications de l'espace et du temps qu'elle entraînait) ni le résultat de l'expérience n'emportaient l'adhésion. La conception de Poincaré paraissait mieux adaptée à la valorisation du résultat de l'expérience de Michelson qu'elle invoquait de manière privilégiée - bien que sa version de la théorie fût construite sur une base plus large et

¹⁸ Cf. Paty (1992b).

antérieure à elle - : mais elle ne proposait apparemment, à travers les mêmes formules mathématiques, que des aménagements à la dynamique. Elle servit en tout cas de transition, pour les physico-mathématiciens, vers l'acceptation finale de la théorie d'Einstein¹⁹. (Paul Langevin lui-même, qui fut l'un des premiers physiciens, et Hermann Minkowski, l'un des premiers mathématiciens, à accepter la théorie d'Einstein dans toutes ses implications - notamment en ce qui concerne l'espace-temps -, en donnèrent une interprétation dynamique, par la réduction à l'électromagnétisme).

C'est ici qu'intervient naturellement dans nos considérations la question de l'objet de la théorie, et de la nature de cet objet, qui trouve une illustration très claire avec le cas de l'électrodynamique, de la Relativité restreinte et de la Relativité générale, eu égard aux rapports de la dynamique et de l'invariance (ou, mieux, de la covariance).

L'objet d'une théorie physique est généralement une dynamique précise, c'est-à-dire une théorie d'un certain type de forces ou d'interactions. Les *Principia* de Newton, par exemple, s'ils définissent le cadre conceptuel général de la mécanique et des lois générales du mouvement des corps soumis à des forces quelconques, l'appliquent aussitôt à une dynamique particulière, celle de la force de gravitation. La théorie électrodynamique de Lorentz est également un exemple de théorie dont l'objet est une dynamique; de même, la théorie relativiste de la gravitation d'Einstein, ou Relativité générale.

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein, au contraire, est une théorie sans dynamique propre - sans objet qui soit une dynamique -, bien qu'elle aît été motivée par la nécessité de critiquer les insuffisances de deux théories dynamiques existantes, à savoir la mécanique et l'électromagnétisme, et bien qu'elle aît eu ensuite des effets sur la reformulation de ces deux théories. Son objet est plus général que les dynamiques particulières que sont la mécanique ou l'électromagnétisme, mais il est également moins déterminé : il n'est autre que la propriété générale de covariance pour les mouvements d'inertie, portant sur les lois de transformation des grandeurs par changement de référentiel de coordonnées, dans de tels mouvements, pour que les lois dynamiques, quelles qu'elles soient, soient invariantes.

Bien que la condition de covariance résulte en une loi cinématique, l'objet de la théorie de la relativité restreinte n'est pas seulement une cinématique, c'est-à-dire une loi de structure spatio-temporelle. Car cette condition porte les lois dynamiques en creux, celles du moins qui sont appelées à respecter la covariance en question: elle exprime une *potentialité* de toute dynamique de ce genre. Par-delà la forme de la cinématique qu'elle exprime, la théorie qui a pour objet cette condition est de nature principielle²⁰, et se prononce sur certains traits fondamentaux des théories dynamiques appelées à la respecter (l'invariance de Lorentz pour les lagrangiens, que Poincaré fut le premier à exprimer d'une

¹⁹ Cf. Paty (1987).

²⁰ Elle revêt, par là, une signification plus large que celle d'être un simple cadre conceptuel, comme le sont les lois générales de la mécanique de Newton, avant la considération de la dynamique gravitationnelle (encore que l'on puisse discuter du statut des trois lois de Newton, et y voir des principes d'une portée semblable).

manière générale)²¹.

Une théorie qui n'a pas pour objet une dynamique paraît être une chose difficile à concevoir, et tel fut, assez longtemps, le sort fait à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. De ce qu'elle était une théorie sans objet dynamique, beaucoup furent enclins soit à lui en attribuer un qu'elle n'avait pas (la dynamique électromagnétique), soit à la voir comme une théorie sans objet, lui déniaient par là tout intérêt. Un trait, rapporté à la considération des phénomènes, illustre la particularité d'une théorie de cette nature et la difficulté à lui concevoir un objet : l'embarras dans lequel on se trouve si l'on à cherche une représentation intuitive d'une expérience qui en serait caractéristique (par où l'on retrouve les expériences de pensée). Ce serait une expérience sans dynamique, ou à dynamique quelconque, une expérience qui ne serait ni *actualisée* comme une expérience réelle, ni *virtuelle* comme une expérience imaginaire, mais seulement *potentielle*. S'il est cependant possible de concevoir une telle expérience de pensée au second degré (sans objet réel ni virtuel), c'est en perdant tout ce qui relève de la dynamique: par exemple, en refaisant, avec Einstein, l'analyse cinématique à partir de la définition des propriétés physiques du temps et de l'espace par l'utilisation des signaux lumineux, ou en raisonnant sur les trains et les gares ou sur le voyageur de Langevin et son jumeau sédentaire.

La différence, en contrepoint, du statut de la théorie de la relativité générale, dont l'objet est une dynamique (la gravitation), est bien rendue par l'évidence d'expériences-types comme celle de l'ascenseur en chute libre, conçue à partir de la loi de la chute des corps de Galilée, comme une exploration de ses implications les plus profondes (l'identité de l'accélération pour tous les corps interprétée en termes d'une égalité des masses inertielle et gravitationnelle portée au rang de "principe d'équivalence"): le mouvement de chute libre annule le champ de gravitation local, les deux correspondant aux mêmes effets physiques. Une telle expérience imaginaire ("virtuelle"), où les objets dans l'ascenseur ne tombent pas ("quand quelqu'un tombe en chute libre, remarquait Einstein, il ne sent plus son propre poids"), est plus aisée à concevoir que la covariance de la Relativité restreinte. Car il s'agit d'effets physiques clairement désignés, champ de gravitation et mouvement uniformément accéléré, portant sur un phénomène précis et assignant des causes, en termes de mouvement, de force et de loi dynamique.

On notera donc le statut intermédiaire de la théorie de la relativité restreinte, dans une évolution de l'objet théorique qui va de l'électrodynamique à la dynamique gravitationnelle : une évolution qui aurait, pour ainsi dire, vidé la première de sa substance, au contenu trop particulier, pour penser la dynamique dans sa généralité, en réalité pour formuler autrement ce contenu, en conformité avec la covariance, et qui aurait ainsi préparé les conditions d'établissement de la seconde, par la généralisation de cette exigence aux transformations quelconques (et grâce au principe - dynamique - d'équivalence). La covariance, cet "objet sans dynamique" de la théorie de la relativité restreinte, montrait par là sa fécondité, par sa capacité à dépasser l'état de simple potentialité pour accéder à une virtualité phénoménale capable de s'actualiser dans l'expérience.

²¹ Voir Paty (1993), chapitres 2 et 4.

Les circonstances de la réception de la théorie de la relativité constituent à cet égard un fait d'histoire, dont il nous est possible de tirer les enseignements à la lumière de l'analyse qui précède. La théorie générale fut mieux acceptée par le milieu scientifique de l'époque considéré dans son ensemble - après l'observation de l'éclipse de 1919 -, pour diverses raisons dont nous avons déjà parlé, mais dont la principale est assurément qu'il s'agissait d'une "vraie théorie", d'une théorie avec un objet dynamique, correspondant à des phénomènes concevables en termes d'expériences avec des causes et des effets. On voit, en particulier, comment ce qui se joue là est d'une autre nature que la précision des observations, et porte sur ce par quoi l'on caractérise généralement un phénomène: où l'on retrouve le qualitatif, au sens de l'accent mis sur l'interprétation conceptuelle, et l'"ordre de grandeur".

La théorie de la relativité restreinte ne fut acceptée alors que dans la foulée de la relativité générale, à cause de leur connexion dans l'ordre des concepts, étant donné qu'il s'agit de deux étapes d'une même théorie (elles furent considérées comme telles, conformément à la pensée de leur inventeur). Lorsque, paradoxalement, la Relativité générale sera ensuite laissée de côté pendant près de cinquante ans, la Relativité restreinte s'affirmera au contraire, et sera pleinement acceptée et mise en oeuvre dans le travail des physiciens (essentiellement à cause de la nécessité de l'incorporer dans la physique des mouvements rapides - intra-atomiques - et des échanges d'énergie entre matière et rayonnement, avec des effets relativement aux expériences).

Ces faits d'histoire, portant sur la réception de la théorie de la relativité, semblent étayer l'idée que la nature de l'objet de la théorie joue un rôle dans la signification que l'on accorde à l'expérience. Si nous revenons à l'expérience de Michelson et Morley à propos de la Relativité restreinte, nous constatons qu'elle a joué un rôle particulier et important dans les travaux et les considérations qui s'attachaient à un objet théorique de nature dynamique (Lorentz et Poincaré, dans la phase de l'élaboration, et la plupart des scientifiques dans la phase de réception qui a suivi la Relativité générale). La même expérience n'a, au contraire, qu'un rôle d'indication parmi d'autres - et elle n'a pas la même interprétation - quand l'intérêt porte sur un objet plus général, comme la covariance. On peut y voir une confirmation de ce que la validation de la preuve (liée à l'expérience) dépend fortement de la structure théorique, et de sa nature. On remarquera qu'il s'agit là d'une caractérisation rationnelle des conditions effectives de la réception, dépassant la notion vague mais commune de consensus psychosocial.

Terminons en soulignant un aspect des circonstances de la réception et des interprétations ultérieures: l'ignorance des processus effectifs d'élaboration théorique et le caractère subjectif des reconstructions qui en ont été faites ont entraîné des conceptions injustifiées, et pour tout dire erronées, sur le rôle de l'expérience dans les processus de connaissance, du moins pour ce qui concerne la physique. Cet effet, dommageable pour la philosophie qui méconnaît l'histoire, se laisse voir dans la vulgate des manuels, dont les présentations courantes de la théorie de la relativité, souvent reprises sans critique, mobilisent deux idées privilégiant le rôle de la mesure, mais également défaillantes, tant du point de vue historique que de celui de la cohérence logique.

On attribue, d'une part, à la théorie de relativité restreinte d'Einstein une expérience particulière, cruciale, censée la fonder et en guider l'interprétation. On mêle, ce faisant, deux logiques de raisonnement, chacune cohérente par rapport à l'objet qu'elles poursuit : on greffe sur celle de Lorentz et de Poincaré le contenu des concepts obtenu par Einstein. On brouille, ce faisant, la *fonction* de l'expérience dans son rapport à une structure théorique, ce qui marque ses effets dans l'*interprétation* qui en est donnée. En l'occurrence, le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley est exprimé indistinctement par une assertion sur la vitesse de la lumière (son isotropie) ou comme une indication sur la validité du principe de relativité, sans que l'on puisse voir le problème que pose, du point de vue théorique, l'isotropie de c . On sait que le moteur du raisonnement d'Einstein fut, en réalité, une confrontation entre ces deux propositions conçues comme étant d'origines différentes, et qu'il s'agissait de concilier²². La vulgate ne retient pas cette distinction, qui fait intervenir des considérations théoriques, et non pas seulement factuelles, et dont l'effacement interdit ensuite de dépasser le point de vue reconstitué de l'induction empiriste.

La seule façon qui reste alors de comprendre la Relativité restreinte consiste, en effet, à attribuer tout le poids aux faits d'expérience et de mesure, que ce soit pour l'expérience de Michelson et Morley ou pour la définition de l'espace et du temps par la mesure de règles et d'horloges. Rien ne demeure des considérations théoriques sur la mécanique et sur l'électromagnétisme (à savoir qu'il y a contradiction entre le principe de relativité de l'une et la constance de la vitesse de la lumière de l'autre, dans leurs formulations d'alors) et sur les phénomènes (que la relativité des mouvements est respectée même dans phénomènes électromagnétiques en dépit de la théorie²³, et que l'isotropie de la vitesse de la lumière en optique la confirme).

L'autre transcription défectueuse concerne la construction de l'espace-temps relativiste, supposée faite à partir de la considération d'une signification observationnelle de ces concepts, bien que, dans son travail, Einstein se soit fondé sur des raisons différentes, beaucoup plus générales - et fondamentales. Il est visible, en particulier, qu'il établit sa reformulation de la signification physique de l'espace et du temps non sur la *mesure* comme instance privilégiée, mais sur les *phénomènes* qu'ils nous permettent de décrire. L'espace et le temps n'existant, physiquement, que justifiés par l'existence des phénomènes, il fallait donc les soumettre, dans leur définition, aux traits généraux de ces phénomènes, c'est-à-dire aux deux principes choisis respectivement pour caractériser ce qui généralise et transcende théoriquement les phénomènes de la mécanique (théorie et phénomènes), à savoir le principe de relativité restreinte, et ce qui généralise et transcende la théorie et les phénomènes électromagnétiques, à savoir la constance de c ²⁴.

Ayant rétabli, contre ces lectures défectueuses, les raisonnements effectifs dans leur exactitude historique et dans leur cohérence logique, soulignons, pour conclure, la leçon principale à tirer de notre analyse: qu'il y a une

²² Voir Paty (1993), chapitre 3.

²³ Il s'agit de l'induction électromagnétique que la théorie basée sur un éther n'expliquait pas de manière bi-univoque.

²⁴ Paty (1993), chapitres 2 à 4.

relation directe entre la nature de l'objet théorique et la signification attachée aux résultats d'expérience qui s'y rapportent. En particulier, les circonstances de la validation sont différentes selon le type de théorie proposée (théorie cinématique et principielle ou théorie dynamique, modification du cadre conceptuel et condition générale pour les phénomènes ou mécanisme particulier d'explication). Le degré d'acceptation du résultat expérimental et la signification qui lui est attribuée apparaissent alors être directement fonction d'une idée normative sur la théorie et sur ce que l'on entend par explication. L'examen d'une autre théorie physique contemporaine, la mécanique quantique, fournirait des éléments complémentaires d'appréciation. Il serait intéressant de comparer ces analyses avec des cas pris dans des sciences moins formalisées tout en étant théoriquement structurées, eu égard en particulier au rapport entre les contenus, les phénomènes et la structure théorique.

REFERENCES

- GLICK, Thomas (ed.) (1987). *The Comparative reception of relativity*, Reidel, Dordrecht, 1987.
- GRANGER, Gilles-Gaston (1968). *Essai d'une philosophie du style*, Armand Colin, Paris; ré-éd. revue, Odile Jacob, Paris, 1988.
- (1992). *La vérification*, Odile Jacob, Paris, 1992.
 - (1993). A ciência pensa ?, *Discurso* (São Paulo), n°22, 1993, 197-204.
- PATY, Michel (1987). The scientific reception of Relativity in France, *in* Glick (1987), p. 113-167.
- (1990). *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, L'Harmattan, Paris, 1990, 222p.
 - (1992a). L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, *in* Dilworth, Craig (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, 1992, p. 73-110.
 - (1992b). La question du statut de l'expérience en physique, *Cahiers d'Histoire et de philosophie des sciences*, n° 40, 1992, 183-197. [Actes du Colloque *Les Procédures de preuve, de validation et d'évaluation dans les sciences et les techniques: une approche historique*, Lille, 11-13 avril 1991]
 - (1993). *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993, 584 p.
 - (à paraître). Le coefficient de Fresnel et la vitesse de la lumière, dans Paty, M. (org.), *Sur l'histoire de l'optique des corps en mouvement*, *Revue d'histoire des sciences*, à paraître.
- PIETROCOLA DE OLIVEIRA, Mauricio (1982). *E. Mascart et l'optique des corps en mouvement*, Thèse, Université Paris-7-Denis-Diderot, 1992.

NOTICE BI(BLI)OGRAPHIQUE

Michel PATY est directeur de recherche au CNRS. Actuellement directeur de l'Equipe REHSEIS (UPR 318) du CNRS, il anime également le DEA d'Epistémologie et Histoire des Sciences de l'Université Paris-7-Denis-Diderot. Il est docteur ès-sciences physiques et docteur en philosophie. Ses recherches portent principalement sur les rapports entre la science et la philosophie, sur les relations entre les mathématiques et la physique, sur la physique contemporaine et sur les sciences au dix-huitième siècle.

Publications récentes:

Livres:

- *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988, xx + 442 p.
- *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique*, L'Harmattan, Paris, 1990, 222p.
- *Les particules et l'univers* (ed. en collab avec Jean Audouze et Paul Musset), Presses Universitaires de France, Paris, 1990, 396 p.
- *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993, 584 p.
- *Einstein, les quanta et le réel* (à paraître).

Articles:

- L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, in Dilworth, Craig (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, 1992, p. 73-110.
- Physical Geometry and Special Relativity: Einstein and Poincaré in Boi, Luciano; Flament, Dominique et Salanski, Jean-Michel (eds.), *1830-1930 : A century of geometry. Epistemology, history and mathematics*, Springer-Verlag, Berlin, 1992, p. 126-149.
- Sur les variables cachées de la mécanique quantique: Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie, *La Pensée*, n°292, mars-avril 1993, 93-116.
- Formalisme et interprétation physique chez Schrödinger, in Bitbol, Michel et Darrigol, Olivier (eds.), *Erwin Schrödinger: philosophy and the birth of quantum mechanics. Philosophie et naissance de la mécanique quantique*, Editions Frontières, Paris, p. 161-190.